

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Макарьева Дмитрия Ивановича на тему «Разработка физико-технологических основ создания высокоанизотропных пьезоматериалов и материалов для аддитивных технологий на основе сегнетопьезокерамики» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники

Диссертационная работа Макарьева Д.И. посвящена разработке физико-технических основ новых анизотропных пьезоматериалов, предназначенных для печати пьезоэлементов по аддитивной технологии, а также исследованию электрических воздействий на существующие материалы с целью увеличения их анизотропии пьезоэффекта. Развитие таких отраслей производства как ультразвуковая медицинская диагностика, ультразвуковая дефектоскопия и гидроакустика приводит к росту требований к характеристикам ультразвуковых преобразователей используемых в качестве источников сигнала для устройств, применяемых в данных отраслях. Основными характеристиками данных устройств является точность и глубина сканирования. Эти характеристики конфликтуют друг с другом, поскольку для увеличения точности требуется увеличивать частоту сигнала, а для роста глубины сканирования – снижать. Компромисс здесь достигается путем сокращения числа периодов в пачке сигнала до минимальных значений в один-два периода. Это налагает высокие требования к преобразователю ультразвуковых сигналов, полоса пропускания которого должна без искажений пропускать весь спектр такого короткого сигнала, что обеспечивается применением в качестве активных элементов в преобразователях пьезоэлементов, обладающих высокой анизотропией пьезоэффекта. Разработка технологии трехмерной печати пьезоэлементов создает возможность отказа от ряда трудоемких технологических операций и позволяет перевести производство пьезоэлементов на качественно иной

уровень. Все вышесказанное свидетельствует об актуальности темы диссертационной работы Макарьева Д.И.

Работа представляет собой законченное систематичное исследование, включающее в себя разработку технологий получения новых композиционных материалов, изучение их электрофизических свойств, а также способов увеличения анизотропии пьезоэффекта уже существующих пьезоматериалов.

Достоверность и надежность полученных результатов подтверждается характеристиками использованной аппаратуры, применяемыми методами изготовления образцов и измерений, а также в отсутствии противоречий полученных результатов с литературными данными. Вследствие этого, результаты работы можно считать достоверными, а сделанные на основе данных результатов выводы - обоснованными.

Полученные Макарьевым Д.И. в диссертационной работе результаты являются **новыми**. Впервые получены образцы пьезоэлементов на основе смесового композита системы «пористая пьезокерамика – полимер» и «пористая пьезокерамика – полимер – металл», изучены электрофизические свойства данных композитов. Определены причины увеличения анизотропии пьезоэлектрических модулей в результате воздействия электрическими полями высокой напряженности у уже существующих пьезоматериалов.

Целью диссертационной работы являлась разработка физико-технологических основ создания новых пьезоматериалов, обладающих высокой анизотропией пьезоэлектрических свойств, включая материалы, предназначенные для изготовления активных элементов по одной из аддитивных технологий, для электромеханических устройств с низкой добротностью и безрезонансных применений.

Полученные результаты обладают высокой **практической значимостью**, заключающейся в разработке методов управления анизотропией образцов, использование которых позволит создавать широкополосные ультразвуковые преобразователи; адаптации аддитивной технология послойного склеивания

порошков для изготовления пьезоэлементов; получении и исследовании смесевых композитов «пористая СПК – полимер»; разработке способов получения пьезоактивного материала на основе смесового композита «пористая пьезокерамика – полимер – металл» и диэлектрического материала на основе композита «пористая пьезокерамика – полимер» с управляемой относительной диэлектрической проницаемостью; получении пьезокомпозитного материала, способного стать основой для создания акустически согласованных со средой излучения излучателей высокоинтенсивного импульсного ультразвука.

Диссертация Макарьева Д.И. состоит из введения, пяти разделов и заключения. Работа изложена на 257 страницах машинописного текста, включающего 72 рисунка, 17 таблиц и библиографию из 166 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность выполненных исследований, сформулированы цель и задачи работы, обоснован выбор объектов исследования, изложены положения, выносимые на защиту, отмечены их научная новизна, достоверность и практическая значимость, приведены сведения о публикациях автора и о его личном вкладе.

В **первом разделе** диссертации приведен обзор литературы, посвященной анизотропии пьезоэффекта сегнетопьезокерамик, пористой керамики, аддитивным технологиям, в том числе и технологиям трехмерной печати пьезоэлементов.

Второй раздел диссертации посвящен рассмотрению объектов и методов исследования. Описаны исследуемые пьезоматериалы и композиты системы «пористая пьезокерамика – полимер», представлены технологии их получения и методики исследования электромеханических свойств.

Основные результаты, полученные автором диссертации, представлены в **3, 4 и 5 частях** диссертации. Наиболее интересным и красивым результатом, на мой взгляд, является получение композитов «пьезокерамика – полимер» и установление условий достижения у него большой анизотропии пьезоэлектрических свойств.

Работа включает внушительное количество экспериментальных результатов и подробные аргументированные описания технологических процессов, применяемых при изготовлении исследуемых автором композитов.

В третьем разделе приведены результаты влияния величины поляризующего поля на анизотропию пьезоматериалов на основе титаната свинца на примере ПКР-70. Показано, что гигантская анизотропия пьезоэффекта данного материала обусловлена формированием в результате данного воздействия анизотропной дефектной структуры микротрещин, ориентированных вдоль поляризующего поля. Также установлено, что в результате многократной циклической переполаризации можно увеличивать анизотропию пьезоэффекта сегнетомягких материалов и материалов средней жесткости, таких как ПКР-1, ПКР-7М и ЦТС-19.

Четвертый раздел посвящен созданию и изучению смесевых композитов системы «пористая пьезокерамика – полимер». Описана технология их получения с подробным обоснованием получения необходимых для практического применения свойств; изучено поведение диэлектрической проницаемости композитов; указаны основные преимущества применения пористой пьезокерамики вместо плотной в качестве пьезоактивной компоненты композита; рассмотрены и объяснены причины, препятствующие появлению пьезоэффекта у многослойных композитов такого типа; на основе представленных в данном разделе исследований автором разработан однослойный композит системы «пористая пьезокерамика – полимер», обладающий достаточными для практического применения конкурентоспособными пьезоэлектрическими свойствами.

В пятом разделе описаны многослойные композиты системы «пористая пьезокерамика - полимер» и «пористая пьезокерамика – полимер – металл». Представлено обоснование применения аддитивной технологии для получения многослойных композитов системы «пористая пьезокерамика - полимер», состоящих из нескольких слоев однослойных композитов и обладающих

пьезоэлектрическими свойствами. Установлено, что основной причиной, способствующей появлению у многослойного композита пьезоэффекта, является внесение проводящей фракции в полимерную матрицу композита.

В **Заключении** автором приведены основные результаты и сформулированы выводы по диссертационной работе.

В целом диссертация выполнена на высоком уровне, результаты и личный вклад автора не вызывают сомнений. Использованные методы соответствуют поставленным задачам.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Вместе с тем, диссертация не лишена *недостатков*.

1. Не смотря на то, что в целом диссертация написана хорошим техническим языком, в тексте встречается некорректная с точки зрения физики терминология, например «образцы *наполяризывались*» общепринятым в данном случае является термин «поляризовались». Более серьезный «жаргон» присутствует при описании экспериментов с керамикой ПКР-70, модифицированной Al_2O_3 , Nb_2O_5 и SnO_2 (раздел 3.2, стр. 107 – 121). Так, если в подписях рис.3.11 – 3.15 говорится именно о модифицированной керамике ПКР-70, то по тексту и в подписях к рис. 3.7 – 3.9 фигурируют «*образцы* Al_2O_3 , Nb_2O_5 или SnO_2 ».

2. При представлении фотографий доменной структуры (раздел 3.4, рис. 3.24, 3.27 и 3.29) отсутствует информация с помощью какого микроскопа (оптического, электронного или др.) получены фотографии. При этом автор обращает внимание только на фигуры травления. В тоже время, присутствие на изображениях зерен трех различных контрастов (рисунки 3.24 и 3.7) также может свидетельствовать о различных зарядовых состояниях, если, например, изображения получены с помощью электронной микроскопии.

3. При описании композита «пористая керамика – полимер» автор отмечает, что диэлектрическая проницаемость композита на порядок меньше составляющих композит частиц пьезокерамики (стр.168). В тоже время,

согласно представленным данным (таблица 4.2 и рис.4.5) для керамики ЦТС-19 с процентным содержанием пор 40 и 30 %, она увеличивается (1 (8) для Керамики ЦТС-19 с 40 (30) % пор – табл. 4.2 и 18–24 для композита на основе этих материалов). Опечатка в таблице, или некорректный вывод?

4. Не совсем корректно описание вероятностного подхода при анализе глубины распространения трещины (раздел 3.2, стр. 103 – 106), поскольку вероятность принять конкретное значение для абсолютной непрерывной случайной величины равна нулю. По всей видимости, в данном случае, имелась в виду *плотность вероятности*. Но не очень понятно как она считалась (почему она привязана к площадям?), потому что, если считать что окончание трещины равновероятно лежит на конце полуокружности, то плотность вероятности для глубины трещины ($x \in [0, S]$) будет равна: $2/\pi\sqrt{S^2 + x^2}$.

Перечисленные выше замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Диссертационная работа Макарьева Дмитрия Ивановича на тему «Разработка физико-технологических основ создания высокоанизотропных пьезоматериалов и материалов для аддитивных технологий на основе сегнетопьезокерамики», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, является научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне и соответствует критериям действующего «Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО "Южный федеральный университет", утвержденного Приказом № 260-ОД от 30.11.2021, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Диссертация соответствует направлению исследования 1 в формуле паспорта специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники. Ее автор – Макарьев Дмитрий Иванович – заслуживает присуждения ему искомой ученой степени доктора

технических наук по специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

Я согласна на обработку моих персональных данных

Официальный оппонент:

 Малышкина Ольга Витальевна

доктор физико-математических наук (специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния), профессор, профессор кафедры компьютерной безопасности и математических методов управления ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет».

Адрес места работы: 170002, г. Тверь, пер. Садовый, д. 35

E-mail: olga.malyshkina@mail.ru

Телефон: +7 9109381411

